

# 新型单相T型五电平非隔离光伏逆变器

黄春平

(中山职业技术学院 信息工程学院, 广东 中山 528404)

**摘要:**提出了一种基于传统单相H桥拓扑和T型NPC拓扑相结合的五电平非隔离单相光伏并网逆变器拓扑结构,该拓扑包括两种结构,即通常的单相全桥和T型中点钳位结构。该拓扑通过一个由双向开关管组成的T型中点钳位结构来获得五电平,称之为T型五电平拓扑。具体分析了该新型拓扑的工作模式与共模漏电流抑制能力,该新型拓扑具有较高的效率,具有较低的泄漏电流,相比于传统的三电平拓扑具有很小的并网电流谐波和较低的开关管电压应力,可以减少并网逆变器的滤波成本和开关管器件成本。最后通过仿真和实验验证了理论的正确性。所提出的T型五电平拓扑符合非隔离光伏并网逆变器的相关标准,适用于光伏逆变器市场。

**关键词:**光伏并网;漏电流;多电平逆变器;非隔离

**中图分类号:**T464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21943

## A Novel Single Phase T-type Five Level Transformerless Photovoltaic Inverter

HUANG Chunping

(School of Information Engineering, Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528404, Guangdong, China)

**Abstract:** A five-level transformerless single-phase PV grid-connected inverter topology based on the combination of traditional single-phase H bridge topology and T-type neutral point clamped (NPC) topology was proposed. The topology includes two structures: the usual single-phase full-bridge and the T type NPC structure. A T type NPC structure consisting of a two-way switch tube was used to obtain five levels in this new topology, which called T type five-level topology. The working mode and common mode leakage current suppression ability of the new topology were analyzed in detail. The new topology has high efficiency and low leakage current. Compared with the traditional three-level topology, it has very small grid-connected current harmonics and low switch voltage stress, which can reduce the filtering cost and switch device cost of grid-connected inverter. Finally, the correctness of the theory was verified by simulation and experiment. The proposed T type five-level topology meets the relevant standards of transformerless PV grid-connected inverters and is suitable for the PV inverter market.

**Key words:** PV grid; leakage current; multilevel inverter; transformerless

相比于带有隔离变压器的传统逆变器而言,单相非隔离光伏并网逆变器具有体积小、重量轻、成本低、效率高的优点,这使得它们成为光伏并网系统中的首选解决方案。图1给出了单相非隔离光伏并网逆变器的基本拓扑结构,由于没有隔离变压器的存在,在光伏电池和电网之间存在一个电气连接,会产生一个流过大地与光伏电池寄生电容的电流,称之为漏电流 $i_{cm}$ ,如图1所示。漏电流产生的

主要原因是光伏电池对地寄生电容的存在,它们是光伏电池的金属框架与大地之间形成的等效电容,以nF为单位。漏电流的存在可能影响系统的效率和可靠性,并可能引起电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)问题。更重要的是,它会对设备和工作人员的安全产生威胁。因此,德国并网逆变器标准DIN VDE 0126—1—1规定,当泄漏电流超过300 mA时,光伏系统必须在0.3 s内断开。

**基金项目:**广东省质量工程项目(GDJG2019490);中山市科技项目(2014A2FC386);2014年度广东  
教育教学成果奖培养项目(GD20141727);中山职院科研重点项目(KYA2104)

**作者简介:**黄春平(1981—),男,硕士,副教授,Email:huangchunping12@sina.com

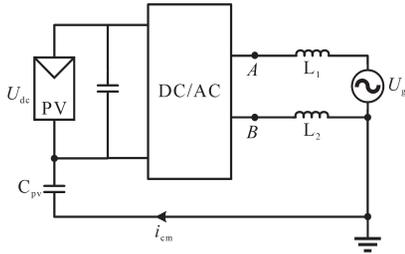


图1 单相非隔离光伏并网逆变器模型

Fig.1 Single phase transformerless PV grid-connected inverter model

文献[1-2]指出,光伏系统中的漏电流的大小和频率主要取决于逆变器的拓扑结构和调制策略。文献[3-5]对不同的非隔离光伏并网逆变器拓扑进行了综述,采用双极性PWM调制方式的单相H桥拓扑和中性点钳位(neutral point clamped, NPC)拓扑是本质上具有漏电流抑制能力的拓扑结构。但双极性调制方式的单相H桥拓扑的输出电压为两电平,谐波含量较大;而NPC拓扑的直流侧电压利用率较低,都不是非隔离光伏并网逆变器的最优选择。

文献[6-12]提出了不同的非隔离全桥拓扑及其处理减小漏电流的调制方案。文献[6]提出了一种H5逆变器拓扑,通过在直流侧增加解耦开关来将光伏电池和电网断开,可以减小泄漏电流。文献[7]提出了一种H6逆变器拓扑,通过增加两个直流侧解耦开关交替工作来减少H5拓扑的开关管损耗分布不均问题。文献[8]提出一种改进的H6来减少开关管导通损耗。文献[9]提出了一种交流侧解耦的全桥拓扑结构,包括一个H桥、两个额外的开关管和二极管,该拓扑在交流侧增加两个解耦开关,能够使用单极性SPWM调制方式来抑制漏电流。文献[10-12]分别在这些拓扑上改进,得到一系列改进拓扑。但所有上述拓扑的输出电压都只有三电平,谐波含量较大。

多电平逆变器可以降低功率开关管的电压应力和输出滤波器的体积,这意味着系统成本的降低,同时多电平逆变器还可以增加拓扑的利用率。基于这些优点,多电平拓扑在光伏系统中的应用也是近年来的研究热点。

文献[13]提出了一种基于光伏系统H桥逆变器的多电平单相逆变拓扑结构,它使用一种双向开关结构来创建输出电压中的五个电平。双向开关由四个二极管和一个开关管组成,但过多的二极管会降低效率。文献[14]提出了一种多电平逆变器分析,分析了效率、可靠性、电能质量和配

电功率损耗,但没有任何关于共模性能的分析。文献[15]提出了多级的逆变器结构,可以得到多电平的输出电压,但该拓扑的多级结构使得其损耗较大,效率较低,同时使用的开关管数量很多,成本较大。

TNPC半桥拓扑在普通半桥拓扑的基础上增加了T型中点钳位结构,将两电平的输出电压变为三电平。本文将TNPC拓扑与单相H桥拓扑相结合,提出了一种T型五电平逆变器拓扑及其正弦PWM调制策略,应用于单相非隔离光伏逆变器,该拓扑主要分为两个结构:T型中点钳位结构和单相H桥。其中点钳位结构使得其具有NPC拓扑的漏电流抑制能力,H桥结构又使得其不需要很大的输入电压,T型五电平逆变器拓扑如图2所示。此外,该拓扑在单相H桥拓扑的基础上将输出电压电平由三电平增加为五电平,总的谐波失真(total harmonic distortion, THD)保持相对较小的值,这有助于减小输出滤波器的尺寸。

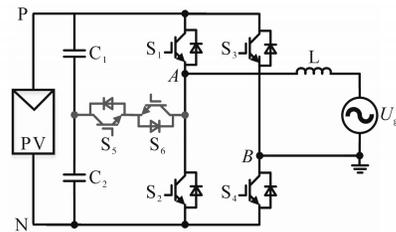


图2 T型五电平逆变器拓扑

Fig.2 T type five level inverter topology

### 1 拓扑工作模态分析

表1为所提出的T型五电平逆变器的六种工作模态开关状态表。图3为所提出的T型五电平拓扑的六种工作模态,它在单相H桥的基础上引入双向开关管将直流母线的中点连接到由S1和S2形成桥臂的中点,从而产生正负两个Udc/2的电平,构造出五电平。

表1 工作模态开关状态表

Tab.1 Operating mode switch state table

| 工作模态           | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|---|---|---|---|---|---|
| S <sub>1</sub> | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| S <sub>2</sub> | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| S <sub>3</sub> | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| S <sub>4</sub> | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| S <sub>5</sub> | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| S <sub>6</sub> | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |

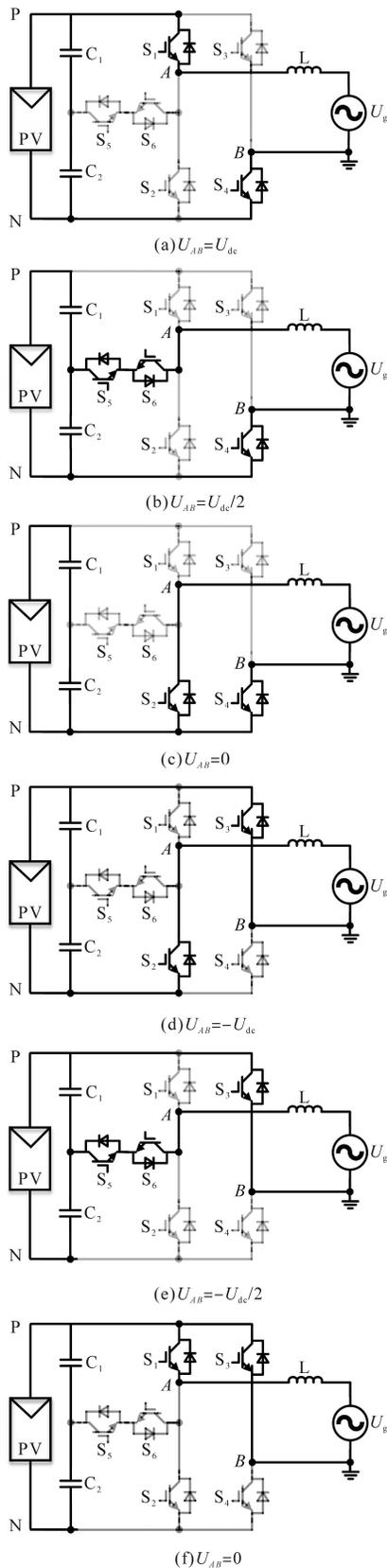


图3 T型五电平逆变器拓扑工作模式

Fig.3 Working modes of T type five level inverter

下面详细分析逆变器的工作模式。

首先,在电网电压正半周期期间:

工作模式1:开关管 $S_1, S_4$ 开通,其他开关管关

断,此时输出电压 $U_{AB}=U_{dc}$ ,光伏电池给电感充电同时向电网传输功率,并网电流通过 $S_1$ 流向电网,并通过 $S_4$ 返回。

工作模式2:开关管 $S_4, S_5$ 和 $S_6$ 开通,其他开关管关断,此时输出电压 $U_{AB}=U_{dc}/2$ ,电容 $C_2$ 给电感充电同时向电网传输功率,并网电流通过 $S_5$ 和 $S_6$ 流向电网,并通过 $S_4$ 返回。

工作模式3:开关管 $S_2$ 和 $S_4$ 开通,其他开关管关断,此时输出电压 $U_{AB}=0$  V,电感供电,并网电流通过电感和开关管 $S_2$ 和 $S_4$ 续流。

其次,在电网电压负半周期期间:

工作模式4:开关管 $S_2, S_3$ 开通,其他开关管关断,此时输出电压 $U_{AB}=-U_{dc}$ ,光伏电池给电感充电同时向电网传输功率,并网电流通过 $S_3$ 流向电网,并通过 $S_2$ 返回。

工作模式5:开关管 $S_3, S_5$ 和 $S_6$ 开通,其他开关管关断,此时输出电压 $U_{AB}=-U_{dc}/2$ ,电容 $C_2$ 给电感充电同时向电网传输功率,并网电流通过 $S_3$ 流向电网,并通过 $S_5$ 和 $S_6$ 返回。

工作模式6:开关管 $S_1$ 和 $S_3$ 开通,其他开关管关断,此时输出电压 $U_{AB}=0$  V,电感供电,并网电流通过电感和开关管 $S_1$ 和 $S_3$ 续流。

综上所述,所提出的新型拓扑共有六种工作模式,可产生五种电平(其中0电平有两种模式)的输出电压,可以降低输出电压的谐波,从而减小滤波器的体积和成本。

## 2 共模特性与电压应力分析

文献[16]给出了单相非隔离光伏并网逆变器共模等效电路图以及共模漏电流的抑制准则,最简等效电路如图4所示,所提出的五电平T型逆变器拓扑的共模模型可以根据该准则得到。

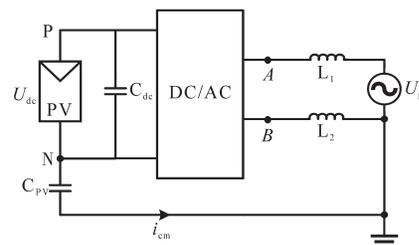


图4 共模等效电路

Fig.4 Common-mode equivalent circuit

定义共模电压和差模电压为

$$U_{CM} = (U_{AN} + U_{BN})/2 \quad (1)$$

$$U_{DM} = U_{AN} - U_{BN} \quad (2)$$

式中: $U_{AN}, U_{BN}$ 为桥臂中点对地电压。

最终将共模等效电路化简为如图5所示的最简等效电路,此处不再赘述,可得总的共模电压为

$$U_{TCM} = U_{CM} + U_{DMC} = \frac{U_{AN} + U_{BN}}{2} + (U_{AN} - U_{BN}) \frac{L_2 - L_1}{2(L_1 + L_2)} \quad (3)$$

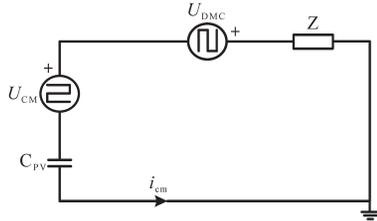


图5 最简等效电路

Fig.5 Minimum equivalent circuit

由图5可知,漏电流  $i_{cm}$  可看作电压源  $U_{CM}$  与  $U_{DMC}$  共同作用在光伏电池的寄生电容上产生的电流,只要总的共模电压  $U_{TCM}$  保持不变,则共模漏电流的值为0。

根据图3所示的新型拓扑工作模式,可以列出如表2所示的工作模式对应电压表。其中,  $U_{AN}$ ,  $U_{BN}$  分别为两个桥臂对光伏电池负端的电压;  $U_{AB}$  为逆变器的输出电压,可以看出,逆变器的输出电压为五电平;  $U_{CM}$  为共模电压;  $U_{TCM}$  为总的共模电压,可以看出,在电网电压正半周期,  $U_{TCM}$  始终为0,在电网电压负半周期,  $U_{TCM}$  始终为  $U_{dc}$ , 总的共模电压均保持不变,仅在周期转换时发生变化,即  $U_{TCM}$  在基波频率处动作。因此  $i_{cm}$  在大多数情况下保持接近零的值,除了在周期变换的瞬间,由于在周期转换时的  $dV/dT$  较高,会出现较大的电流尖峰。

表2 新型拓扑工作模式对应电压

Tab.2 New topological mode corresponding voltage

| 工作模式 | $U_{AN}$   | $U_{BN}$ | $U_{AB}$    | $U_{CM}$    | $U_{TCM}$ |
|------|------------|----------|-------------|-------------|-----------|
| 1    | $U_{dc}$   | 0        | $U_{dc}$    | $U_{dc}/2$  | 0         |
| 2    | $U_{dc}/2$ | 0        | $U_{dc}/2$  | $U_{dc}/4$  | 0         |
| 3    | 0          | 0        | 0           | 0           | 0         |
| 4    | 0          | $U_{dc}$ | $-U_{dc}$   | $U_{dc}/2$  | $U_{dc}$  |
| 5    | $U_{dc}/2$ | $U_{dc}$ | $-U_{dc}/2$ | $3U_{dc}/4$ | $U_{dc}$  |
| 6    | $U_{dc}$   | $U_{dc}$ | 0           | $U_{dc}$    | $U_{dc}$  |

为得到所提出的工作模式,使用正弦位移PWM调制策略。可以将对应的工作模式变换分为以下四个区间。区间1:工作模式1与工作模式2相互转换,输出电压从  $U_{dc}/2$  变化到  $U_{dc}$ , 然后反之。区间2:工作模式2与工作模式3相互转换,输出电压从0变化到  $U_{dc}/2$ , 然后反之。区间3:工作模式4与工作模式5相互转换,输出电压从0变化到  $-U_{dc}/2$ , 然后反之。区间4:工作模式5

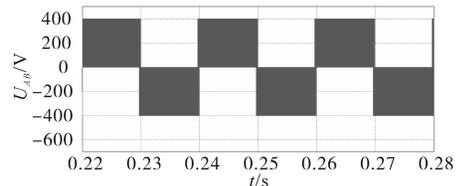
与工作模式6相互转换,输出电压从  $-U_{dc}/2$  变化到  $-U_{dc}$ , 然后反之。

其中,开关管  $S_3$  和  $S_4$  在电网频率上以互补的方式动作,开关管  $S_5$  和  $S_6$  在整个电网周期中以开关频率动作。开关管  $S_1$  和  $S_5$  或  $S_6$  以互补的方式在区间1和区间4运行,开关管  $S_2$  和  $S_3$  或  $S_6$  以互补的方式在对应于区间2和区间3运行。

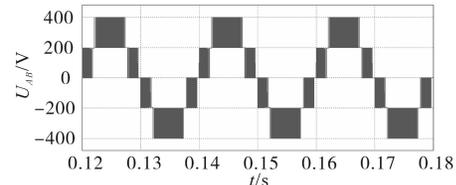
五电平拓扑在三电平拓扑的基础上增加了两个额外的工作模式:工作模式2和工作模式5,分别减小了开关管  $S_4$  和开关管  $S_3$  的电压应力。

### 3 仿真与实验验证

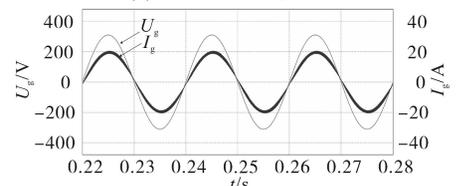
在PSIM软件中搭建了1kW的新型逆变器拓扑和典型的H5拓扑的仿真模型进行验证,仿真参数如下:输出功率1kW,开关频率20kHz,输入电压DC 400V,寄生电容75nF,电网电压AC 220V,输入电容100μF,电网频率50Hz,输出电感5mH。验证了所提出的五电平T型拓扑的并网效果以及漏电流抑制效果,仿真波形如图6所示。



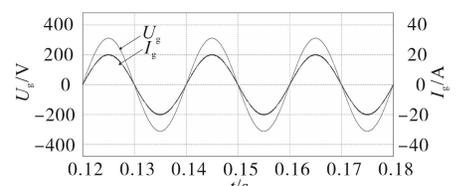
(a)H5拓扑输出电压仿真波形



(b)新型拓扑输出电压仿真波形



(c)H5拓扑电网电压、并网电流仿真波形



(d)新型拓扑电网电压、并网电流仿真波形

图6 新型T型拓扑仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of the new T type topology

图6a为H5拓扑输出电压仿真波形,为一个三电平的输出电压;图6b为新型拓扑输出电压仿真波形,为一个五电平的输出电压;图6c和图6d

分别为H5拓扑的电网电压、并网电流的仿真波形和新型拓扑的电网电压、并网电流的仿真波形,可以看出电网电压和并网电流的相位一致,功率因数接近100%,但新型拓扑的并网电流THD远远小于H5拓扑,谐波含量很少。

使用相同的参数搭建了1 kW的实验平台,实验波形图如图7所示。图7a为漏电流实验波形,可以看出,仅在正负周期变换时会出现比较大的漏电流,其幅值约为50 mA,满足德国标准DIN-VDE0126-1-1的要求。在其他时刻,漏电流的值几乎为0,图7b为输出电压实验波形,输出电压为较好的五电平波形,谐波较小,图7c为电网电压和并网电流波形图,新型拓扑的并网效果良好。

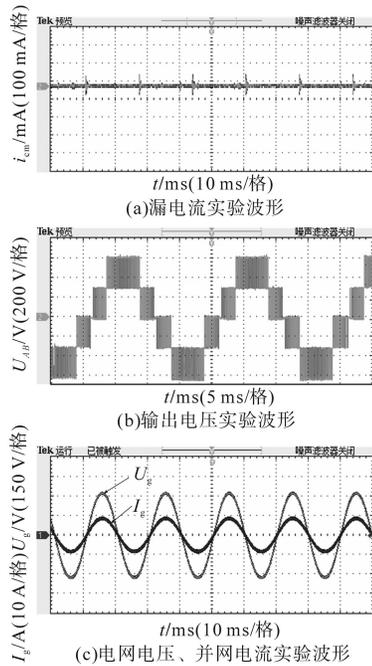


图7 新型T型拓扑实验波形

Fig.7 Experiment waveforms of the new T type topology

## 4 结论

提出了一种多电平T型非隔离拓扑及其调制技术。该拓扑在传统的单相H桥逆变器基础上增加了T型中点钳位结构来构成五电平拓扑。五电平拓扑相对于三电平拓扑而言,可以降低谐波含量,减少开关管的电压应力。同时,该新型T型五电平拓扑可以抑制漏电流,仅在正负半周交替时会产生共模漏电流,在其他时刻基本没有漏电流的产生。分别分析了新型拓扑的六种工作模式,并对其共模特性分析。

通过PSIM仿真软件搭建了1 kW的仿真模型,并搭建了1 kW的实验样机来验证所提出拓

扑的正确性,实验结果表明新型T型五电平拓扑具有更好的漏电流抑制能力和更小的谐波。

## 参考文献

- [1] 曾洋斌,李虹,郑琼林,等.单相非隔离光伏并网桥式逆变器的拓扑相通性及演化规律[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6681-6690.
- [2] 廖志凌,崔晓晨,熊颖杰,等.非隔离光伏并网逆变器漏电流抑制技术研究综述[J].电测与仪表,2015,52(22):100-107.
- [3] 肖华锋,杨晨,谢少军.NPC三电平并网逆变器共模电流抑制技术研究[J].中国电机工程学报,2010,30(33):23-29.
- [4] Teymour H R, Sutanto D, Muttaqi K M, et al. Modulation technique and a new balancing control strategy for a single phase five-level ANPC converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1215-1227.
- [5] 蔡慧,高翔.光伏并网逆变器控制策略的研究[J].电气传动,2019,41(6):1-8.
- [6] 郭小强,李健,魏宝泽,等.无变压器非隔离型三电平光伏逆变器载波调制对系统漏电流影响分析[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4167-4174.
- [7] 曹晨晨,廖志凌.共地型无漏电流单相非隔离光伏并网逆变器[J].中国电机工程学报,2020,40(4):1063-1072.
- [8] 陈亚爱,赵军伟,周京华,等.单相并网/离网双模式逆变器控制策略综述[J].电气传动,2020,50(5):39-47.
- [9] 李莲英,苗小利,张坤平.三电平光伏逆变器漏电流和中点平衡研究[J].电气传动,2018,48(10):28-32.
- [10] Cui W, Luo H, Gu Y, et al. Hybrid-bridge transformerless photovoltaic grid-connected inverter[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(3): 439-446.
- [11] Li W, Gu Y, Luo H, et al. Topology review and derivation methodology of single-phase transformerless photovoltaic inverters for leakage current suppression[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4537-4551.
- [12] Vázquez N, Rosas M, Hernández C, et al. A new common-mode transformerless photovoltaic inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6381-6391.
- [13] Kadam A, Shukla A. A multilevel transformerless inverter employing ground connection between PV negative terminal and grid neutral point[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8897-8907.
- [14] Ardashir J F, Sabahi M, Hosseini S H, et al. A single-phase transformerless inverter with charge pump circuit concept for grid-tied PV applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 46(7): 5403-5415.
- [15] 周皓,邸彩芸,赵志,等.一种基于H6型并网逆变器调制策略的研究[J].电气传动,2020,50(2):35-38.
- [16] 李钊,张立强,袁绍民,等.5 kW单相光伏逆变器的系统设计[J].电气传动,2016,46(8):36-39.

收稿日期:2020-05-22

修改稿日期:2020-06-07